

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.002

沿江某城市建成区污水处理系统问题分析及对策研究

蔡乾凌, 袁园, 章亮, 吴倩影, 张田, 徐祥
(南京大学环境规划设计研究院集团股份公司, 江苏 南京 210093)

摘要: 以沿江某城市建成区污水收集及处理系统为例,通过水质和水量的定性定量分析、管网排查检测、现场踏勘等方法,探究外水类型及占比,分析污水收集及处理系统中的污染物沿程浓度变化。因地制宜,从“挤外水”角度提出提质增效对策措施,提高污水处理系统进水污染物浓度,促进该沿江城市建成区污水收集及处理系统的提质增效,加快推进区域水环境的质量改善。

关键词: 三角分析法; 挤外水; 提质增效

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0009-06

Problems Analysis and Countermeasures Investigation of Sewage Treatment System in a Built-up Area of a City along the Yangtze River

CAI Qian-ling, YUAN Yuan, ZHANG Liang, WU Qian-ying, ZHANG Tian,
XU Xiang
(Academy of Environmental Planning & Design Co. Ltd., Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Taking the sewage collection and treatment system in the urban built-up area along the Yangtze River as an example, various methods including qualitative and quantitative analysis of water quality and quantity, pipeline network detection and site survey were adopted. The type and proportion of external water and the variations of contaminants concentration in sewage collection and treatment system along the way were analyzed. According to local conditions, the countermeasures of improving quality and increasing efficiency are put forward from the perspective of “squeezing the external water”, including increasing the concentration of pollutants in the sewage treatment system, promoting the quality and efficiency of the sewage collection and treatment system in the built-up area of a city along the Yangtze River, and accelerating the improvement of the quality of the regional water environment.

Key words: triangular analysis; squeezing the external water; quality and efficiency improvement

国家及各省制定的城镇污水处理提质增效三年行动实施方案的最终目标是实现污水管网全覆盖、全收集、全处理,对提质增效目标的考核则体现在提高污水集中收集率和污水处理系统的污染物浓度两方面。污水处理系统进水污染物浓度低是

很多城镇污水处理厂面临的问题^[1-2],由于排水管网历史欠账及缺乏日常运维等,外水进入污水收集系统的问题比较严重。外来水的混入主要引起以下问题:①导致管网高水位运行^[3],增加污水收集及处理系统的水力负荷;②导致污水处理系统的污染物

浓度偏低,降低污水处理效率;③加剧污水处理系统进水水质和水量波动等。以沿江某城市建成区的污水收集及处理系统为例,采用水量三角分析法分析系统汇入外水占比,对降雨、河道水位及污水处理系统进水水质、水量进行相关性分析;基于污水收集及处理系统中的污染物沿程浓度变化,研究地下水及河水入渗、河水倒灌、管道沉积及微生物降解对污染物浓度降解的贡献。

1 研究区域污水系统概况

1.1 研究区域概况

该沿江城市建成区位于长江下游沿岸,江淮交汇处,为江淮冲击平原,城市建成区面积约35.0 km²。该城市属副热带湿润气候区,四季分明,雨量充沛,降雨量主要分布在6月—9月。城市建成区内河众多,水系发达,现状水面率约14%。

城市建成区各区新建区域基本为雨污分流制,但由于历史遗留问题,老城区、城乡接合部等存在雨污合流制。

1.2 污水收集及处理系统概况

1.2.1 污水收集概况

城市建成区范围内市政污水管网长约150 km,市政雨污合流管网(渠)长约33 km,其中沿河污水

管道约14.5 km;污水泵站8座。污水收集及处理系统范围内存在4处沿河箱涵,其中3处为全线暗涵,沿线居民小区较多,上游河道整体水环境较差,且自建成后就未实施过清淤;剩余1处沿河箱涵服务老城区,箱涵渗漏严重且存在安全隐患。

1.2.2 污水处理系统概况

污水处理系统现状规模为 8×10^4 m³/d,采用Orbal氧化沟工艺(见图1),分三级处理,最终出水达到一级A标准后排放。

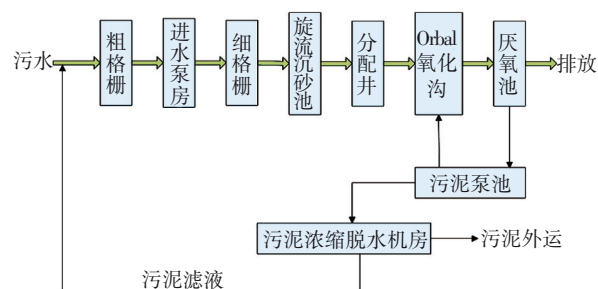


图1 污水处理系统工艺流程

Fig.1 Process flow chart of sewage treatment system

1.3 污水收集及处理系统存在的问题

1.3.1 外水入侵

对居民每日排放生活污水量及污水处理系统进水量数据进行比较,结果见表1。

表1 居民日排放生活污水量及污水处理系统进水量数据

Tab.1 Data of residents' daily discharge of domestic sewage and water inflow of sewage treatment system

年份	人均综合生活用水指标/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	用水人口/万人	城市污水排放系数	污水收集率/%	居民排放生活污水量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	污水处理系统平均进水量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
2018	200	25.31	0.8	80	3.24	5.48
2019	200	28.1	0.8	80	3.60	6.15
2020	200	30.2	0.8	80	3.87	6.49

由表1可知,该污水处理系统2018年、2019年、2020年的平均进水量与计算得到的居民生活污水排放量差值依次为:2.24×10⁴、2.55×10⁴、2.62×10⁴ m³/d,由此可认为污水处理系统进水存在外水入侵现象。

1.3.2 进水污染物浓度低

2017年—2020年该污水处理系统进水水质数据见表2。

表2 污水处理系统进水水质

Tab.2 Influent quality of sewage treatment system

项 目	2017年	2018年	2019年	2020年
进水BOD ₅	32.0	29.1	47.7	41.9
进水COD	103.3	104.6	133.5	123.4

由表2可以看出,2017年—2020年平均进水COD为116.2 mg/L,平均进水BOD₅为37.7 mg/L,低于提质增效要求(进水COD≥260 mg/L、BOD₅≥100 mg/L)。由此可知,该污水处理系统具有进水水质浓度低的特点。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究涉及的污水处理系统进水水质和水量数据来源于当地污水处理系统运营单位提供的水质水量报表(2017年1月—2021年1月);河道水位数据来源于当地水务局;降雨天数、降雨量等降雨数据来源于当地气象局;用水人口数据来源于当地住建局。

2.2 研究方法

2.2.1 污水处理系统中外水总量及组成类型占比

① 污水处理系统外水总量

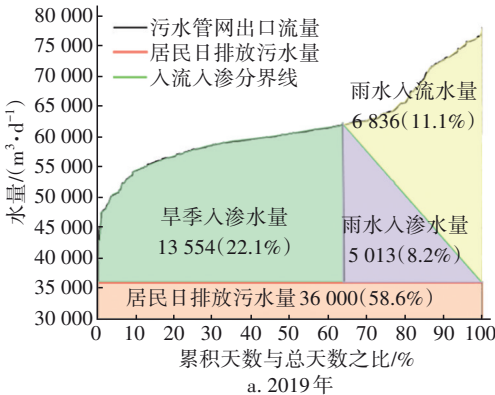
由表 1 可知,2018 年、2019 年、2020 年污水处理系统进水中的外水水量分别约为 2.24×10^4 、 2.55×10^4 、 $2.62 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,外水量占污水处理系统进水总量的比例分别为 40.88%、41.52% 和 40.53%。

② 外水组成类型及占比

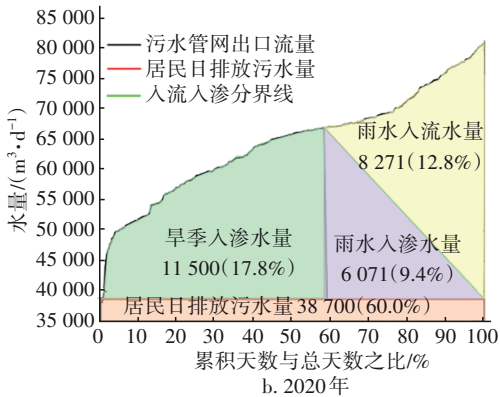
晴天污水管网中总水量可分为居民日排放生活污水量^[4]、地下水与河水入渗量(包含河水倒灌水量);雨天污水管网中总水量由晴天污水管网总水量及降雨引起的入流入渗水量组成。地下水与河水入渗量称为旱季入渗水量。

基于污水处理系统 2019 年及 2020 年日均进水量数据、2019 年及 2020 年降雨量数据等,采用水量平衡三角分析方法,绘制 2019 年及 2020 年污水系统进水组成三角分析图和外水组成类型占比图,对污水处理系统进水中雨水的混入比例进行定量分析。

污水系统进水组成三角分析图纵轴为升序排列的污水管网出口流量(污水处理系统进水量),横轴为升序排列后的累积天数与总天数的比例。2019 年总天数为 365 d,晴天数为 233 d;2020 年总天数为 366 d,晴天数为 213 d。分别过点 233/365 及 213/366 做与纵轴平行的直线,将此作为旱季雨季分界线;过早季雨季分界线与污水管网出口流量交点、右纵轴与居民排放污水量交点做直线,将此作为入流入渗分界线。2019 年及 2020 年污水收集及处理系统水量组成三角分析图见图 2。各区域面积利用曲线拟合、积分法计算得到,入渗水量包含旱季入渗水量和雨水入渗水量,雨水入流入渗水量包含雨季雨水入流量和雨水入渗水量。



a. 2019 年



b. 2020 年

图 2 2019 年及 2020 年污水收集及处理系统水量组成三角分析图

Fig.2 Triangle analysis chart of the water composition of sewage collection and treatment system in 2019 and 2020

2019 年居民日排放污水量约占系统进水量的 58.6%,旱季入渗量即地下水与河水入渗水量约占系统进水量的 22.1%,雨水入流量约占系统进水量的 11.1%。其中,入渗水量约占系统进水量的 30.3%,雨水入流入渗量约占系统进水量的 19.3%。

2020 年居民日排放污水量约占系统进水量的 60.0%,旱季入渗水量约占系统进水量的 17.8%,雨水入流量约占系统进水量的 12.8%,其中,入渗水量约占系统进水量的 27.2%,雨水入流入渗水量约占系统进水量的 22.2%。

2.2.2 降雨对水量和水质的影响分析

基于当地 2018 年—2020 年降雨数据及污水处理系统进水量、水质数据,选取 2019 年 8 月及 2020 年 8 月数据,研究降雨量对污水处理系统进水量、进水 BOD₅ 浓度的影响,结果见图 3。

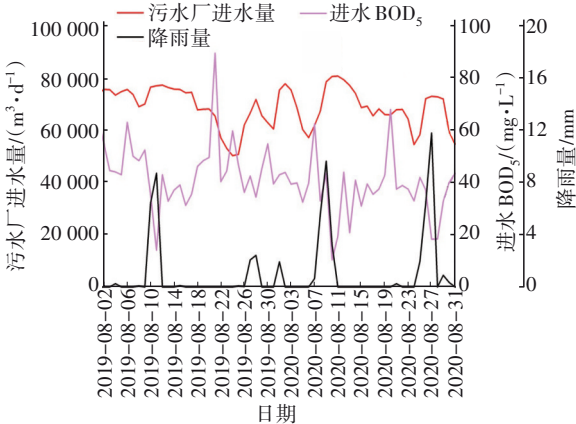


图 3 雨季污水处理系统进水量、进水 BOD₅ 与降雨量关系

Fig.3 Relation between rainfall and influent volume and influent BOD₅ concentration of sewage treatment system in rainy season

由图3可知,污水处理系统进水BOD₅浓度与降雨量之间呈现出一定的负相关性($r=-0.11$),但相关性较弱。雨量少时,进水BOD₅浓度较大;雨量大时,进水BOD₅浓度明显降低。将2019年及2020年8月的降雨量按降序排列,对应的日期依次为2020年8月27日、2020年8月9日、2019年8月11日、2019年8月10日、2020年8月26日。对照BOD₅浓度曲线可知,这几日的进水BOD₅浓度也处于较低水平,呈现明显的谷值。污水处理系统进水量与降雨量之间呈现一定的正相关性,但相关性较弱。2020年8月9日及2020年8月27日降雨量较大的两日,对应的污水处理系统进水量较高,呈现明显的峰值。2019年8月10日降雨量较大,随之至2019年8月11日及2019年8月12日,污水处理系统进水量也明显处于较高水平。

2.2.3 降雨、河道水位对水量和水质的影响分析

由于历史原因,该市建成区存在大量合流箱涵、沿河污水管道。此外,排水主干管网运行时间长,受道路荷载及水力冲刷等影响,难免出现破损、渗漏以及拍门损坏等情况,导致河水进入管网,对污水处理系统进水量、进水水质造成一定程度的冲击。

基于当地2018年—2020年的降雨数据、河道水位及污水处理系统进水量和水质,选取2019年8月及2020年8月降雨量、污水处理系统进水量、进水BOD₅、A河道水位,一方面研究降雨量对河道水位的影响,另一方面研究降雨量、河道水位对污水处理系统进水量、进水BOD₅的影响。

分析结果表明:

① 降雨量与A河道水位的相关系数 r 为0.66,降雨量与A河道水位之间呈现中度正相关性。降雨量越大,A河道水位越高。晴天,A河道水位维持在3.2~3.3 m,降雨量较大时,A河道水位可达3.88 m。

② A河道水位与污水处理系统进水量相关系数 r 为0.46,A河道水位与污水处理系统进水量呈低度正相关性。2020年8月15日—9月15日,河道水位与污水处理系统进水量呈正相关,A河道水位越高,污水处理系统进水量越大。A河道水位处于高水位时,进水量达70 000 m³/d左右;低水位时,进水量约55 000~60 000 m³/d(见图4)。

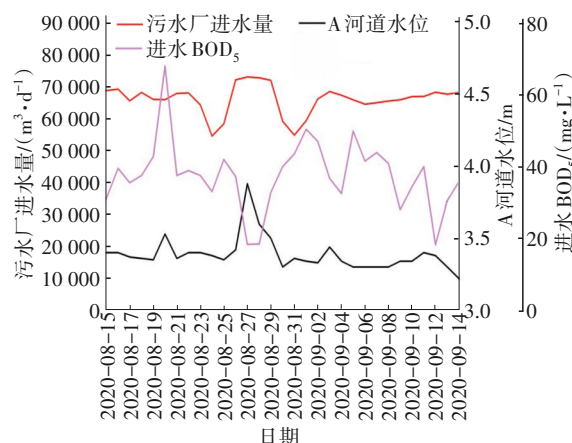


图4 污水处理系统进水量、进水BOD₅与河道水位关系

Fig.4 Relation between river water level and water inflow and influent BOD₅ concentration of sewage treatment system

③ A河道水位与污水处理系统进水BOD₅的相关系数 r 为-0.28,呈负相关性。根据图4,2020年8月15日—9月15日,A河道水位越高,污水处理系统进水污染物浓度越低(见图4)。A河道水位处于高水位时进水BOD₅低至20 mg/L,低水位时进水BOD₅可达50~70 mg/L,相差近3倍。

综上所述及基于当地历史原因,该沿江城市建成区存在大量合流箱涵、沿河污水管道,雨季降雨、河道高水位对污水处理系统进水量及水质有直接影响,降雨量影响比重较小,河道高水位影响比重较大,说明河水倒灌现象十分严重。

2.2.4 晴天管网关键节点水质沿程分析

以该沿江城市建成区污水收集及处理系统的一条管网主线为研究对象,选取居民小区污水节点井W1、小区排水汇入市政主干管节点井W2、污水提升泵站W3及污水处理厂进水W4作为关键节点井。在晴天情况下进行采样,检测各节点井COD、氨氮浓度并研究其沿程浓度变化。

检测结果表明,沿程COD、氨氮浓度下降明显,居民小区排水COD、氨氮浓度最高,平均浓度分别为333、69.3 mg/L。居民小区排水汇至市政主干管,污染物浓度降低,市政主干管的COD、氨氮平均浓度分别为252、47.4 mg/L。汇入中间污水提升泵站后,污染物浓度进一步降低,污水提升泵站的COD、氨氮平均浓度为123、24.8 mg/L。污水处理厂进水与中间污水提升泵站的污水浓度相近,COD、氨氮平均浓度分别为130、24.1 mg/L。

市政主干管、污水处理厂的COD浓度较居民小区水质降低比例分别为24%、61%;市政主干管、污水处理厂的氨氮浓度较居民小区水质降低比例分别为32%、65%。

基于水质分析结果及提质增效现场踏勘调查,居民小区排水至市政主干管污水浓度降低原因主要有以下几点:

① 污染物管道沉积及降解

采用S-P模型估算COD在污水管道中的降解,具体公式如下:

$$C = C_0 e^{-K \frac{x}{86400u}} \quad (1)$$

式中: C 为节点COD浓度,mg/L; C_0 为COD初始浓度,mg/L; K 为COD降解常数; x 为输送距离,m; u 为污水输送流速,m/s。

该案例 K 取 0.2 d^{-1} , u 取 0.2 m/s ,居民小区与市政主干管、污水泵站的距离分别为2.6、4.4 km,由此计算可知,居民小区污水经管道输送至市政主干管、污水泵站的COD理论降解量分别为10、17 mg/L,污水COD浓度自居民小区至市政主干管、污水泵站,微生物降解率分别为3.0%、5.0%。

采用Pisano、Queiroz沉积物中COD的污染负荷计算模型,以及Boston、Fitchburg沉积物模型简化模型,COD和TS沉积量的计算公式分别如下:

$$\text{COD} = 0.875 \text{TS}^{1.04} \quad (2)$$

$$\text{TS} = 0.00057031L^{1.063}S^{-0.436}Q^{-0.61} \quad (3)$$

式中: L 为排水管道长度,m; S 为平均坡度; Q 为人均流量,L。

基于实际排水情况, S 取0.3%, Q 取200 L,居民小区距离市政主干管、污水泵站分别为2.6、4.4 km。计算可知,居民小区污水COD至市政主干管、污水泵站的日沉积量分别为2.1、3.0 mg/L,污水COD浓度自居民小区至市政主干管、污水泵站在管道中的沉积率分别为0.63%、0.9%。

综上,污水中的COD自居民小区至市政主干管、污水泵站经管道沉积及微生物降解的浓度衰减率分别为3.63%、5.9%。

② 排水管网缺陷引起的地下水^[5-6]和河水入渗

a. 居民小区至市政主干管间江中东侧河道上游设有合流箱涵,对该合流箱涵污水采样检测得COD约141 mg/L,由此可知合流箱涵污水稀释了污水浓度。

b. 居民小区至市政主干管间有3处倒虹管,水质检测数据表明,2处倒虹管运行状况良好;1处倒虹管有破损渗漏情况,导致居民小区至市政主干管的污水浓度降低。

c. 根据第三方管网检测单位提供的报告,居民小区至污水主干管约2.6 km,管网结构性缺陷达33个/km,其中3级、4级缺陷达9个/km。管网的结构性与功能性缺陷、污水检查井渗漏导致地下水入渗,从而使污水收集及处理系统的污水浓度降低。

③ 河水倒灌

居民小区至市政主干管不存在河水倒灌问题,因此此管段的COD减少原因主要为:a. COD在污水管道中存在沉积及微生物降解作用,比例为3.63%;b. 管道、箱涵缺陷引起地下水与河水入渗,COD削减比例为18.37%。

市政主干管至污水泵站存在河水倒灌问题。河水倒灌口位于市政主干管W2节点井北侧约600 m处,且河水倒灌量比较大,使得市政主干管至污水提升泵站出水浓度明显降低。

管道沉积及微生物降解、管道及箱涵缺陷引起的地下水及河水入渗、河水倒灌对排水管网COD浓度降低的各因素贡献比例分别为5.9%、20%、37.1%。河水倒灌对所研究污水管线COD浓度的影响较大。

参照《室外排水设计标准》(GB 50014—2006,2016年版),地下水与河水入渗量一般为污水总量的10%~15%。基于该沿江城市地质条件、排水管网缺乏日常运行维护现状、污水管道使用年限较长、排水管网结构性与功能性缺陷检测数据等,将居民小区至市政主干管排水管段的地下水及河水入渗(不包含河水直接倒灌)的渗漏比例取20%是合理的。

在现场调查中发现,所研究的排水管段倒灌河水量较大,使得该管段研究中的河水倒灌比例比较高,与杨楠等^[7]的结论(平原高地下水位地区污水处理厂进水浓度影响因素由大到小分别为地下水入渗、管道沉积和降解、河水倒灌、降雨)稍有区别。

3 建议与措施

该沿江城市建成区污水处理系统外水类型主要包括:旱季入渗(地下水入渗、河水入渗、河水倒灌)、雨季入渗和雨水入流。

该污水处理系统进水污染物浓度低的影响因素主要有:降雨(雨水入流入渗)、河水倒灌、地下水与河水入渗、污水在管道中的沉积和微生物降解。

因此,为促进污水收集处理系统的提质增效,提高污水处理系统进水污染物浓度,对策措施应从“挤外水”角度展开。

① 改造有混接的雨水及合流制排口、沿河截污管道截流井等防倒灌设施,降低地表水倒灌风险,减少进入污水收集及处理系统的外水。

② 协调水位调度、降低水体水位、避免河水倒灌进入污水收集及处理系统。

③ 开展雨污水管网排查检测工作,修复存在结构性缺陷、功能性缺陷以及混接错接的污水管道、箱涵,避免地下水入渗和雨水混入。

④ 开展源头雨污分流工作,减少采用末端截流方式解决污水直排入河问题,降低河水倒灌风险,减少进入污水收集及处理系统的外水。

4 结论

① 汇入目标污水处理系统的外水量占比按降序排列依次为旱季入渗、雨水入流、雨水入渗。外水汇入严重,导致污水处理厂进水污染物浓度较低,影响污水处理效能的发挥。

② 晴天各因素对COD降低贡献比例按降序排列依次为河水倒灌、旱季入渗、污染物在管道中的沉积和微生物降解作用。

③ 提质增效对策措施围绕“挤外水”展开,以提高污水处理系统进水污染物浓度,加快推进区域水环境质量的改善。

参考文献:

- [1] 唐建国,张悦,梅晓洁. 城镇排水系统提质增效的方法与措施[J]. 给水排水, 2019, 45(4):30-38.
TANG Jianguo, ZHANG Yue, MEI Xiaojie. Strategies and methods for improving the quality and efficiency of the urban drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(4):30-38(in Chinese).
- [2] 孙永利. 城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2):9-14.
SUN Yongli. Connotation and way of quality and efficiency improvement of municipal wastewater

treatment [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2):9-14 (in Chinese).

- [3] 胡和平,王绍彪,廖瑜. 污水管网高水位运行原因及对策措施研究[J]. 给水排水, 2021, 47(2):128-132.
HU Heping, WANG Shaobiao, LIAO Yu. Research on the causes and solutions for high water level operation of sewage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(2):128-132 (in Chinese).
- [4] 王小婷,姚越,周炜,等. 基于三角分析法的城市污水管网入流入渗量评估[J]. 水污染及处理, 2019, 7(4):152-159.
WANG Xiaoting, YAO Yue, ZHOU Wei, et al. Quantification of inflow and infiltration in urban sewer systems based on triangle method [J]. Water Pollution and Treatment, 2019, 7(4):152-159(in Chinese).
- [5] KARP C, KREBS P. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach[J]. Water Research, 2011, 45(10):3129-3136.
- [6] 郑凯凯,周振,周圆,等. 城镇污水处理厂进水中地下水、河水及雨水混入比例研究[J]. 环境工程, 2020, 38(7):75-80.
ZHENG Kaikai, ZHOU Zhen, ZHOU Yuan, et al. A quantitative study on proportion of groundwater, river water and rainwater in influent of urban wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7):75-80 (in Chinese).
- [7] 杨楠,张栋俊,张练,等. 平原老城区污水处理提质增效实施策略分析[J]. 给水排水, 2020, 46(7):22-26.
YANG Nan, ZHANG Dongjun, ZHANG Lian, et al. Analysis of implementation strategies for improving wastewater treatment quality and effectiveness in the old urban plain area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(7):22-26 (in Chinese).
- 作者简介:蔡乾凌(1988-),男,江苏南京人,本科,工程师,注册公用设备工程师(给水排水),研究方向为城镇排水。
E-mail:qlcai@njuae.cn
收稿日期:2021-10-05
修回日期:2021-12-16

(编辑:丁彩娟)